

Jana BOHÁČOVÁ¹, Stanislav STANĚK², Martin VAVRO³

MOŽNOSTI APLIKACE ALKALICKY AKTIVOVANÝCH SYSTÉMŮ VE STAVEBNICTVÍ

POSSIBLE APLICATIONS OF ALKALI ACTIVATED SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Abstrakt

Príspevok sa zaoberá možnosťmi využitia alkalicky aktivovaných systémů ve stavebnictví. Článek shrnuje výhody a nevýhody geopolymérů v porovnání s portlandskými cementy, rekapituluje výzkumy a praktické aplikace alkalicky aktivovaných systémů u nás i v zahraničí a nabízí přehled směrů, ve kterých se mohou tato alternativní anorganická pojiva v budoucnosti velmi dobře uplatnit.

Klíčová slova

Alkalicky aktivovaný systém, geopolymér, pojivo, stavební hmoty.

Abstract

This paper deals with the possibilities of use of alkali activated systems in construction. This article summarizes the advantages and disadvantages of geopolymer in comparison to Portland cement, summarizes research and practical applications of alkali activated materials in our country and abroad, and provides an overview of directions where these alternative inorganic binders can be in the future very well applied.

Keywords

Alkali-activated system, geopolymer, binder, building materials.

1 ÚVOD

Alkalicky aktivované materiály, někdy obecně zjednodušeně označované rovněž jako geopolymery, patří mezi alternativní skupinu anorganických pojiv. Geopolymery jsou složité kompozity, jejichž pojivovou složku tvoří aluminosilikáty v kombinaci s alkalickými aktivátory [1]. Velký zájem o výzkum a praktické užití geopolymérů ve stavebnictví lze zaregistrovat zejména v posledních 10 – 15 letech. Možnost zužitkovat při výrobě kompozitů na geopolymerní bázi odpadní materiály z různých průmyslových odvětví a také vynikající konečné vlastnosti vzniklých produktů totiž předurčují tuto skupinu pojiv jako vhodnou ekologickou alternativu portlandských cementů.

Předložený příspěvek rekapituluje rešeršní formou základní směry možného uplatnění alkalicky aktivovaných materiálů především v oblasti stavebnictví.

¹ Ing. Jana Boháčová, Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 968, e-mail: jana.bohacova@vsb.cz.

² Ing. Stanislav Staněk, Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 968, e-mail: stanislav.stanek.st@vsb.cz.

³ Ing. Martin Vavro, Ph.D., Oddělení geomechaniky a báňského výzkumu, Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., Studentská 1768/9, 708 00 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 728 963 397, e-mail: martin.vavro@ugn.cas.cz.

2 MATERIÁLY VHODNÉ PRO ALKALICKOU AKTIVACI

Pro přípravu alkalicky aktivovaných systémů jsou jako pojiva používány latentně hydraulické látky nebo pucolány. Tato pojiva svoji hydraulicitu projeví až po přidání vhodného aktivátoru a potřebného množství vody. Pojiva jsou přírodního nebo technogenního původu, nejčastěji jsou využívány vysokopeční strusky, popílky, metakaolíny a případně také přírodní pucolány [2].

Funkci aktivátoru plní hydroxidy, křemičitany nebo uhličitany alkalických kovů [1]. Konečná struktura, a z ní vyplývající vlastnosti jednotlivých alkalicky aktivovaných systémů se pak liší především v závislosti na použitých surovinách, poměru jednotlivých složek, druhu kameniva, způsobu přípravy a podmínkách uložení [1, 2, 3].

Rozmanitost výsledných produktů je ještě navýšena snahou připravit různá pojiva specifických vlastností, kdy jsou jako suroviny použity směsi mnoha materiálů. Výslednými produkty jsou pak materiály označované jako alkalicky aktivované cementy, anorganické polymerní betony, geocementy, hydrokeramika, či alkalicky vázaná keramika [2].

Všeobecně nejlepších výsledků pevnosti dosahují alkalicky aktivované systémy na bázi vysokopeční strusky [1]. Díky svému, v současnosti hojněmu využití v cementářském průmyslu se však vysokopeční struska postupně stává nedostatkovou surovinou a sílí tak snaha se jejímu použití v alkalicky aktivovaných systémech vyhnout, nebo alespoň snížit její množství na nejnížší možnou úroveň při současném zachování požadovaných vlastností konečných produktů. Jemně mletá granulovaná vysokopeční struska je ve stavebnictví používána zejména jako vhodná náhrada portlandského cementu při výrobě cementového betonu nebo jako komponenta při výrobě směsných cementů. Výsledky experimentálního výzkumu zabývající se až 100 % -ní náhradou hmotnosti portlandského cementu jemně mletou vysokopeční struskou při výrobě cementového betonu jsou popsány v [4].

Alkalicky aktivované systémy na bázi metakaolínu dosahují celkově nízkých pevností, ovšem výsledné materiály jsou značně odolné vůči působení vnějších vlivů, zejména proti působení mrazu, agresivních látek a vysokých teplot [1].

Geopolymery připravené z popílků nemají tak vynikající odolnost, ve srovnání s metakaolínem ale dosahují obecně vyšších pevností [1]. Dle [1] jsou z hlediska relativního faktoru náročnosti, jenž zohledňuje ekonomické a ekologické vlivy jednotlivých materiálů, nejvíce vhodné popílky z hnědého a černého uhlí. Jsou vedlejším produktem ze spalování, pro jejich zpracování do alkalicky aktivovaných směsí již nejsou zpravidla potřebné žádné další úpravy. Oproti tomu nejméně vhodné jsou pro použití, dle zmíněné studie, metakaolíny. Důvodem je především nutnost jejich předchozího výpalu při teplotách kolem 750 – 850°C [1, 5].

3 ROZDÍLY MEZI ALKALICKY AKTIVOVANÝMI SYSTÉMY A CEMENTY

Zásadní rozdíly mezi průběhem hydratace alkalicky aktivovaných systémů a hydratací portlandského slínku se odrážejí také v rozdílných konečných užitných vlastnostech produktů.

Pokud při hydrataci portlandského cementu s vodou vnikají C-S-H gely a Ca(OH)_2 , pak při alkalické aktivaci granulovaných vysokopečních strusek vznikají především C-S-H gely a v malé míře také zeolitické fáze. Oproti tomu materiály připravené na bázi metakaolínů a popílků obsahují především zeolitické fáze typu $(\text{Na}, \text{K})_n\{-(\text{Si-O})_x-\text{Al-O}\}_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$ [1, 3].

Základním rozdílem ve výsledku hydratačních procesů je tedy fakt, že alkalicky aktivované systémy neobsahují portlandit, který v hydratovaném portlandském cementu představuje nejslabší článek kompozitního systému. Díky variabilitě ve složení použitých surovin vzniká ve vytvořené geopolymerní směsi často několik různých typů výsledných produktů [2]. Na základě výzkumu závislosti množství a druhu hydratačních produktů na typu suroviny a na množství aktivátoru je zřejmé, že směrem od portlandského slínku, přes strusky, popílky k metakaolínu je nutné zvyšovat množství Na_2O v alkalickém aktivátoru, a místo uhličitánů používat hydroxidy a křemičitany [1].

Mezi výhody alkalicky aktivovaných materiálů oproti cementům patří zejména to, že mnohem méně zatěžují životní prostředí. Kromě skutečnosti, že při alkalické aktivaci nedochází

k produkci oxidu uhličitého, dalším významným pozitivem je pak fakt, že jako hlavní suroviny mohou být využívány velkoobjemové odpadní průmyslové materiály, například vysokopecní strusky nebo elektrárenské popílků. Použití vedlejších produktů šetří zásoby primárních nerostných surovin. Použitím alkalicky aktivovaných systémů tedy odpadá energeticky náročný výpal vápence, který je základní surovinou při výrobě portlandského slínku.

Nezanedbatelnou výhodou těchto systémů je možnost použití méně kvalitního, do běžných betonů nevhodného plniva, například kameniva s vysokým obsahem jemných částic, jako jsou výsivky z lomů. Výzkumem bylo ověřeno, že se v alkalicky aktivovaných systémech výborně uplatňují také různé odpady, například cihelný a betonový recyklát, či struskové kamenivo, u kterého bylo doloženo, že při smísení s alkáliemi a vodou reaguje povrch kameniva lépe než povrch křemenného písku, což příznivým způsobem ovlivňuje nárůst pevnosti [6].

U alkalicky aktivovaných systémů bylo prokázáno, že mají schopnost vázat do své struktury těžké kovy a radioaktivní odpad, aniž by došlo ke změně morfologie systému, nebo k výraznému ovlivnění procesu tuhnutí a tvrdnutí jako u tradičních cementů. Na základě výsledků vyluhovatelnosti těžkých kovů byly alkalicky aktivované materiály se zeolitickou strukturou shledány vhodnou matricí pro fixaci těžkých kovů [7].

Alkalicky aktivované systémy jsou oproti běžným cementům mimořádně odolné vůči působení agresivních látek z vnějšího prostředí, ať se již jedná o vodu mořskou nebo odpadní. Tato korozní odolnost je zapříčiněna hutnou mikrostrukturou, minimální pórovitostí a přítomností fází zeolitického charakteru, což v rámci praktické aplikace řadí geopolymery mezi materiály použitelné do kanalizačních systémů, vlnolamů a mostních pilířů [8].

Struskoalkalické betony dosahují přibližně o 15 % nižší hodnoty součinitele tepelné vodivosti než betony na bázi portlandského slínku. Díky nízké namrzavosti alkalické směsi je lze využít k betonování za nízkých teplot a to až do $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ [9]. Byla také prokázána vysoká soudržnost alkalicky aktivovaných systémů s ocelí, což je zásadní ve vyztužených betonech [9]. Pro přípravu geopolymérů nejsou potřebná žádná speciální zařízení, současné prostředky používané při výrobě betonů jsou k jejich přípravě zcela postačující. Mezi další výhody alkalicky aktivovaných materiálů patří minimální smrštění, vodonepropustnost a žáruvzdornost [10]. Vývin hydratačního tepla je u geopolymérů o třetinu až o polovinu menší než u portlandského cementu [9], což umožňuje výrobu masivních stavebních prvků. Pozitivem jsou rovněž vysoké počáteční pevnosti, kdy se pevnosti v tlaku po 2-4 hodinách od počátku tuhnutí pohybují okolo 10 – 25 MPa.

Nevýhodou geopolymérů, v porovnání s portlandskými cementy, je používání žiravin při jejich výrobě, tento problém však může být řešen například použitím pevných metakřemičitanů, kdy se do směsi přidává pouze voda nutná pro zvlhnutí směsi a „nastartování“ hydratačních reakcí. Problémem je také vysoká cena aktivátorů (především draselného vodního skla, jehož cena je cca třikrát vyšší než u skla sodného), což však může být vyřešeno použitím průmyslových odpadů alkalického charakteru. Největší překážkou se tak při použití geopolymérů jeví jejich extrémně krátké doby tuhnutí a tvrdnutí. Tyto je možno částečně prodloužit použitím retardérů, nejvíce se prozatím osvědčily fosfáty a boritany u strusko-alkalických betonů a dále Rudal (roztok křemičitanu sodného s obsahem hlinitanu sodného) u geopolymérů vyrobených z popílku, strusky a metakaolínu [9].

4 HISTORIE A SOUČASNOST VÝZKUMU GEOPOLYMERŮ

První použití alkalicky aktivovaných systémů spadá s největší pravděpodobností již do starověku, polemizuje se zejména o jejich užití při stavbě pyramid v Egyptě a zikkuratů v Mezopotámii. V souvislosti s využíváním alkalicky aktivovaných systémů se spekuluje také o civilizacích ve Střední a Jižní Americe a o mnoho staletí později také v souvislosti se stavbami starověkého Říma. Na základě informací o vyspělosti tehdejších kultur, jejich ekonomické situaci, zeměpisné poloze a dle výsledků chemických analýz dochovaných staveb lze usuzovat, že tehdejší lidstvo dokázalo tyto materiály vyrobit [11].

Novodobé výzkumy byly zahájeny v první polovině 20. století. Jedním z prvních zaznamenaných užití alkalicky aktivovaných materiálů v průmyslu byla aplikace směsi na bázi

kaolínu a uhličitanu sodného při teplotě 150 °C v keramických závodech Olsen v roce 1934 [12]. Ve třicátých letech byl rovněž prováděn výzkum vhodnosti použití hydroxidu sodného a draselného v kombinaci s vysokopeční struskou jako možné přísady do portlandských cementů. V průběhu zkoumání uvedených systémů zjistil belgický vědec Purdon, že přidáním alkálií vznikají nová, rychle tvrdnoucí pojiva [13].

Alkalicky aktivované struskocementy nazývané „Trief cements“ byly vzhledem k vývinu menšího hydratačního tepla používány v 50. letech hlavně k výstavbě mohutných konstrukcí [14]. V roce 1953 byly geopolymery zkoumány i americkou armádou, kdy byla alkalická aktivace prováděna smísením 1,5 % NaCl a 1,5 % NaOH a 97 % mleté strusky [14].

V padesátých letech se výzkumem alkalicky aktivovaných strusek na Ukrajině zabýval profesor Gluchovskij, který se pak v průběhu 60. a 70. let významně podílel na identifikaci produktů solidifikace. V rámci výzkumu zjistil, že složky spolu reagují za vzniku zeolitů. Betony vytvořené na bázi alkalické aktivace strusky touto technologií označil názvem „gruntocementy“ a popsal je v knize „Gruntosilikáty“ vydané v roce 1959. V roce 1969 získal na přípravu těchto materiálů první patent [15]. V návaznosti na jeho výzkum byla postavena v 60. letech na Ukrajině první stavba, a to budova z prefabrikovaných bloků připravených dle jeho receptury. Po záměně jílu vysokopeční struskou byly tzv. struskoalkalické betony používány při stavbách kanalizací a dalších, prostředím značně namáhaných konstrukcí [12].

V 70. letech zkoumali vznik geopolymérů také francouzští vědci Besson, Caillere a Henin v roce 1969 byla výsledkem jejich práce syntéza různých kaolinitických látek v koncentrovaném roztoku hydroxidu sodného při teplotě 100 °C [15].

V roce 1972 tým vědců Davidovics a Latapie připravil směs pro výrobu voděodolných keramických obkladů, jež mohly být vyráběny při teplotách nižších než 450 °C, tedy nemusely být páleny [16]. V 70. letech tým Davidovits a Legrand rozvinuli technologie založené na geosyntéze. Joseph Davidovits, považující se za objevitele geopolymérizace, v roce 1978 použil pro alkalicky aktivované materiály na bázi kaolínu poprvé výraz geopolymér [16]. Ačkoli Davidovitsové definici geopolyméru vyhovuje pouze systém, v němž je jako pojivo použit jen a pouze čistý metakaolín, bývají tímto zjednodušeným názvem v současné době často označovány všechny alkalicky aktivované materiály, bez ohledu na použité suroviny.

V České republice se výzkumem alkalicky aktivovaných materiálů pro stavebnictví začal jako první zabývat již v 60. letech 20. století prof. Brandštetr na VUT v Brně [8, 9, 12].

Od první poloviny 70. let se výzkumem geopolymérů zabývá rovněž Ústav skla a keramiky Vysoké školy chemicko-technologické v Praze, později ve spolupráci s Fakultou stavební ČVUT v Praze [17, 18]. V roce 1979 byly společným týmem VŠCHT a ČVUT formulovány principy přípravy bezsádrovcového portlandského cementu, označovaného jako „BS cement“, který je připraven z portlandského cementu, případně strusky, alkalické soli a anioaktivního tenzidu. Takto vyrobený cement je rychle tvrdnoucí, přičemž je schopný tvrdnutí při teplotách až -30°C, je odolný vůči vysokým teplotám až do 1200°C, a nejvyšší naměřené pevnosti v tlaku dosahovaly hodnoty až 245 MPa. BS cement byl v roce 1989 zkušebně aplikován do průmyslově vyráběných stavebních hmot, z něj vyrobený beton dosahoval pevnosti 100 MPa [18]. V 90. letech se Ústav skla a keramiky na VŠCHT zabýval geopolymery na bázi metalurgických strusek a popílků. Konečné směsi obsahující směs popílku a strusky dosahovaly pevnosti v tlaku až okolo 170 MPa. V roce 2002 byl vytvořen geopolymerní bezcementový beton na bázi úletového popílku - POPbeton® [17]. Tento materiál dosahuje pevnosti v tlaku až 60 MPa, je odolný vůči působení solí (Na₂SO₄, NaCl, MgSO₄) a vysokých teplot. Hlavní výhodou tohoto betonu je však využití odpadních materiálů při jeho výrobě. V současné době je technologie POPbetonu® optimalizována a jsou zkoumány další materiálové vlastnosti tohoto betonu, například přilnavost k různým materiálům, vliv přísad a příměsí na vlastnosti betonu, trvanlivost betonu při různých způsobech namáhání nebo dilatační chování POPbetonu® při běžných ročních intervalech a při kritických teplotách [17].

Výzkumy na VŠCHT v Praze probíhající od roku 2003 se zabývají zvládnutím technologie přípravy kaší, malt a betonů z geopolymérů v závislosti na způsobu využití konečného výrobku.

Cílem výzkumu je také nalezení optimálního složení aktivátoru, stanovení mikromechanických vlastností pomocí nanointendace, podrobný popis mechanismů alkalické aktivace, dosažení požadovaných vlastností u jednotlivých typů směsí, fixace těžkých kovů v matici polymeru, stanovení výluhů geopolymérů na bázi popílku, chemické odolnosti materiálu v silně kyselých a zásaditých prostředích, vazby geopolyméru na betonářskou výztuž [17].

Ústav průmyslové keramiky FMFI VŠB – TUO v oblasti alkalicky aktivovaných systémů dlouhodobě řeší problematiku použití strusek ze sekundární metalurgie, a to především strusek z pánvových pecí. Dlouhodobý výzkum se zabývá změnami vlastností geopolymérů v závislosti na proteplování a použitím aktivátoru. V současnosti je na fakultě řešena také možnost užití suchých aktivátorů, tedy pevného vodního skla [2, 3].

Ústav struktury a mechaniky hornin AVČR, v.v.i. v Praze se, pod vedením doc. Straky, věnuje možnostem využití geopolymérů při likvidaci radioaktivních a nebezpečných odpadů a k přípravě ohnivzdorných, zvukově i tepelně izolačních materiálů. V roce 2005 představila skupina pracovníků z Oddělení chemie geopolymérů materiál Benit, což je geopolimer na bázi popílku. Jeho výhodou je možnost použití nekvalitního, do betonu nepoužitelného kameniva a také možnost použití slané vody jako záměsové, bez negativního vlivu na výsledné pevnosti [19].

Výzkumný ústav anorganické chemie, a.s., Ústí nad Labem se zabýval výzkumem vlastností a způsobem přípravy dvousložkového geopolymerního pojiva, jehož pevnou složku tvoří metakaolín a jemně mletá vysokopecní granulovaná struska, a druhá, kapalná složka je připravena z vody a sodného alkalického aktivátoru [20]. Na tomto pracovišti rovněž byly, pod vedením Ing. Koutníka, vyrobeny materiály pro rekonstrukci historických památek, a to za využití kaolinitických jíílů a jílovců, surovin hojně se vyskytujících na území České republiky [21, 22, 23].

Od roku 2004 se v oblasti výzkumu geopolymérů angažuje také Česká rozvojová agentura, o.p.s. Jejím hlavním cílem je propagace technologií, podpora výzkumů a zavádění geopolymérů do stavební praxe [15].

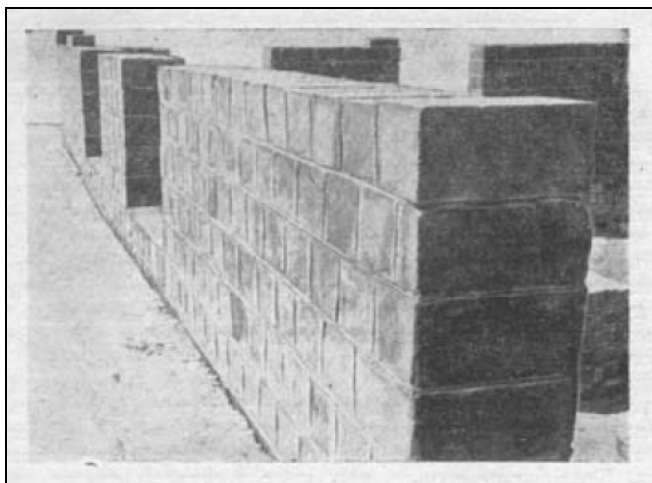
Na Fakultě stavební VŠB-TU Ostrava probíhá výzkum geopolymérů od roku 2008. V rámci možného využití těchto systémů ve stavebnictví byly zkoumány alkalicky aktivované vysokopecní strusky s plnivem na bázi různých odpadů ze stavebnictví (cihelný a betonový recyklát) a z těžby (výsivky, odpadní písky z plavení kaolínu). V současnosti je výzkum zaměřen na přípravu tepelně-izolačních alkalicky aktivovaných stavebních materiálů, lisovaných geopolymerních směsí, na vývoj injektážních směsí a ochranných geopolymerních vrstev [24, 25, 26].



Obr.1: Detail kopie kamenné plastiky, vytvořené dusáním geopolymerní směsí na bázi vysokopecní strusky, metakaolínu a odpadního písku z úpravy kaolínu [24]

5 HISTORIE APLIKACE GEOPOLYMERŮ

První praktické užití geopolymérů ve stavebnictví je známo z 60. let 20. století. Na Ukrajině byla postavena stavba z gruntosilikátových bloků vyrobených podle receptury profesora Gluchovského (Obr. 2 [1]).



Obr. 2: Stavba z gruntosilikátových bloků [1]

Od 60. let byly stavěny ze struskoalkalických betonů kanalizační systémy, komunikace a vlnolamy v Rusku, Polsku, Finsku, USA, Kanadě, u nás a později také ve Španělsku, v Německu a jiných státech [12].

Dalšími stavebními výrobky byly žáruvzdorné dřevoštěpkové desky z roku 1972 navržené Legrandem, které byly tvořené dřevěným jádrem obaleným geopolymerní hmotou. Jejich tovární výroba však vzhledem ke změně tehdejší stavební politiky zahájena nebyla [15]. V letech 1977 - 1982 vznikaly L.T.G.S. technologie. Jednalo se o postup, při němž bylo u keramické pasty obsahující kaolinit dosaženo v zásaditém prostředí vysokých pevností a odolnosti vůči působení vody [15].

V letech 1979 - 1995 byly ve Francii rozvíjeny technologie výroby geopolymerního pojiva. Příkladem mohou být napěněné geopolymerní hmoty, či tekutá pojiva [16].

V roce 1983 byl v USA vyvinut vysokopevnostní geopolymerní cement PYRAMENT™. Byl vyroben z portlandského cementu, popílku, metakaolínu, mleté strusky a uhlíčitanu draselného. Tento cement byl použit při opravách letištních ploch. Vyzkoušel vysoké počáteční pevnosti, okolo 20 MPa již po 4 hodinách zrání, po 28 dnech byly naměřeny pevnosti v rozmezí 70 – 100 MPa [15].

V roce 1989 byl v ruském městě Lipeck postaven dvacetiposchodový dům ze struskoalkalického betonu bez použití portlandského cementu [27].

6 SOUČASNÉ UPLATNĚNÍ GEOPOLYMERŮ V ČR

V současné době jsou na území České republiky vyráběny geopolymery nebo suroviny určené přímo pro jejich výrobu.

Příkladem praktické aplikace alkalicky aktivovaných systémů je geopolymerní pojivo Baucis produkované Českými lupkovými závody a. s., surovina na bázi kaolinitu. Baucis se vyrábí kontrolovaným tepelným zpracováním kaolínů a lupků. Po smíchání pojiva s vodou a alkalicky rozpustnými křemičitany vznikne materiál chemicky i strukturně srovnatelný s přírodní horninou. Teplota výpalu tohoto cementu je 750°C. Materiál vyniká velmi rychlým tvrdnutím, 40 - 50 % konečné pevnosti je dosaženo po 1 dni zrání a 90 % pevnosti je dosaženo během 7 - 14 dnů zrání. Pojivo je vhodné do žáruvzdorných výrobků, přičemž může být vystaven teplotám až 1200°C [28].

Dalším příkladem využitím geopolymerních systémů v praxi je pojivo GEOPOL®. Tato technologie společnosti SAND TEAM spol. s r.o. je určena pro výrobu forem a jader určených pro odlévání železných a neželezných kovů (Obr. 3). Výhodou použité technologie je možnost recyklace použitých materiálů, minimální mechanický ořez, dobrá zpracovatelnost a vysoká pojivová schopnost při velmi nízkém dávkování pojiva [29]. Společnost nachází uplatnění odlévaných forem na bázi geopolymérů především v USA, kde sílí tlaky na ochranu životního prostředí [30].



Obr. 3: Část formy pro výrobu bronzových odlitků [30]

Za podpory České rozvojové agentury jsou v malosériových linkách vyráběny různé prototypy geopolymerních výrobků, imitujících nejrůznější materiály, například cihly (Obr. 4), kámen a dokonce i dřevo (Obr. 5 a 6.) a kovy (Obr. 7) [15].



Obr. 4: Prototyp geopolymerní imitace cihly [15]



Obr. 5: Prototyp geopolymerní imitace dřeva [15]



Obr. 6: Prototypy geopolymerní imitace dřeva – barevná škála [15]



Obr. 7: Prototyp geopolymerní imitace mosazi [15]

7 PERSPEKTIVA

Na základě výše uvedených faktů lze konstatovat, že ačkoli geopolymery mají v novodobých dějinách ani ne stoletou historii a v současnosti jsou stále relativně málo známé, znamenají v mnoha ohledech budoucnost stavebnictví a dalších průmyslových odvětví.

Jejich širšímu uplatnění zatím brání neexistence norem pro jejich zkoušení, používání tekutých žiravin při jejich výrobě a také konzervativní smýšlení stavebníků, kteří se brání použití netradičních pojivových systémů. Vzhledem k požadavkům na udržitelný rozvoj a zachování surovinových zdrojů však můžeme v relativně krátkém období očekávat rozmach i na trhu s výrobky na bázi alkalicky aktivovaných systémů.

8 ZÁVĚR

Cílem příspěvku bylo shrnout historické i současné vědecké výsledky a praktické aplikace na poli alkalicky aktivovaných systémů.

Alkalicky aktivované materiály tvoří rozsáhlou skupinu anorganických pojiv s rozdílnými vlastnostmi v závislosti na vstupních surovinách. Rozšíření využití geopolymérů je žádané, neboť při jejich výrobě mohou být používány materiály odpadního charakteru a nestandardní kamenivo.

Pevnost, trvanlivost a odolnost těchto materiálů byly již ověřeny mnoha výzkumy a znamenají jednoznačný podnět k rozšíření alkalicky aktivovaných systémů do stavební praxe v mnohem větší míře, než je tomu doposud.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován za finančního přispění MŠMT, podporou specifického vysokoškolského výzkumu - Studentské grantové soutěže VŠB - TU Ostrava pod identifikačním číslem SP2012/14.

LITERATURA

- [1] ŠKVÁRA, F. *Alkalicky aktivované materiály - geopolymery*. Praha, 2007. ISBN 978-80-7080-004-1. Dostupné z: <http://www.vscht.cz>. VŠCHT v Praze, Ústav skla a keramiky.
- [2] VLČEK, J. *Materiálové využití strusek z metalurgie železa a oceli metodou alkalické aktivace*. Ostrava, 2008. Habilitační práce. VŠB-TUO, FMMI.
- [3] TOMKOVÁ, V. VŠB - TUO, FMMI. *Vliv fázového složení a mikrostruktury na funkční vlastnosti geopolymerních systémů z technogenních pucolánů*. Ostrava, 2008.
- [4] LEMBÁK, M., VÁCLAVÍK, V.: Příprava a některé fyzikálně mechanické vlastnosti betonu na bázi jemně mleté vysokopecní strusky. In *Partikulárne látky vo vede, priemysle a životnom prostredí*. Košice: TU Košice. 2003, vol. 4, 3-11. ISBN 80-8073-058-X.
- [5] ŠKVÁRA, F. *Concrete based on fly ash geopolymers*. Praha, 2007. VŠCHT Praha, Ústav skla a keramiky.
- [6] BRANDŠTETR, J. Struskoalkalické betony. *Stavivo*. 1984, č. 3, s. 110-114.
- [7] MINAŘÍKOVÁ, M. *Fixace těžkých kovů v matrici geopolyméru*. Praha, 2004. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/>. Disertační práce. VŠCHT v Praze.
- [8] BRANDŠTETR, J. a P.V. KRIVENKO. Alkalické cementy a betony. *SILIKA*. 1999, 26 – 28.
- [9] BRANDŠTETR, J., O. MELUZÍN, J. KOHUT a Š. ZAVŘEL. Příprava a některé vlastnosti struskoalkalických betonů. *Stavivo*. 1986, s. 182-188.
- [10] WANG, S.D., X.C. PU, K.L. SCRIVENER a P.L. PRATT. Alkali-Activated Slag Cement and Concrete: A Review of Properties and Problems. *Advances in Cement Research*. 1995, č. 7, s. 93-102.
- [11] DAVIDOVITS, J. *Nové dějiny pyramid*. Olomouc: Fontána, 2006. ISBN 80-7336-341-0.

- [12] BRANDŠTETR, J., KOLOUŠEK, D., VOREL, J., OPRAVIL, T., BAYER, P.: Geopolymery, geopolymerní cementy a betony. *SILIKA*. 2005, 7-8, 208 - 211.
- [13] DAVIDOVITS, J. *Geopolymer: chemistry*. 2nd ed. Saint-Quentin: Institute Géopolymre, 2008, 587 s. ISBN 29-514-8201-9.
- [14] DAVIDOVITS, J. Geopolymers, Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*. 1991, č. 37, 1633 - 1656.
- [15] *Www.claypolymers.com* [online]. 2012 [cit. 2012-09-3]. Dostupné z: www.claypolymers.com
- [16] ČESKÁ ROZVOJOVÁ AGENTURA, O.P.S. *Současný stav výzkumu v oblasti geopolimerů*. 2005, 285 s.
- [17] [Http://www.geopolymery.eu/](http://www.geopolymery.eu/) [online]. 2012 [cit. 2012-09-03]. Dostupné z: <http://www.geopolymery.eu/>
- [18] [Http://www.geopolymers.net/](http://www.geopolymers.net/) [online]. 2012 [cit. 2012-09-03]. Dostupné z: <http://www.geopolymers.net/>
- [19] [Http://irms.cas.cz](http://irms.cas.cz) [online]. 2012 [cit. 2012-09-03]. Dostupné z: <http://www.irms.cas.cz/>
- [20] [Http://www.lidovky.cz/tiskni.asp?r=ln_veda&c=A051105_153418_ln_veda_hrn](http://www.lidovky.cz/tiskni.asp?r=ln_veda&c=A051105_153418_ln_veda_hrn) [online]. 2012 [cit. 2012-09-03]. Dostupné z: www.lidovky.cz
- [21] [Http://www.vuanch.cz/cz/](http://www.vuanch.cz/cz/) [online]. 2012 [cit. 2012-09-03]. Dostupné z: <http://www.vuanch.cz/cz/>
- [22] [Http://umc.ujep.cz/](http://umc.ujep.cz/) [online]. 2012 [cit. 2012-09-03]. Dostupné z: <http://umc.ujep.cz/>
- [23] DĚDEČKOVÁ, I.: Možnost využití alkalicky aktivovaných materiálů jako umělého kamene. *Kámen*. 2012 č. 18, 60 – 63.
- [24] KOUTNÍK, P., BORTNOVSKY, O., ANTOŠ, P., ROUBÍČEK, P.: Geopolymerní pojiva a jejich využití při výrobě umělých pískovců. In *Sbor. Sanace a rekonstrukce staveb 2010*. Praha: WTA CZ a Kloknerův ústav ČVUT. 2010, 130 - 135. ISBN 978-80-02-02273-2.
- [25] VAVRO, M., BUJDOŠ, D., PTICEN, F., VLČEK, J.: Umělé pískovce na bázi geopolimerů. In *Sbor. Sanace a rekonstrukce staveb 2009*. Praha: WTA CZ a Kloknerův ústav ČVUT. 2009, 71 – 77. ISBN 978-80-02-02190-2.
- [26] BOHÁČOVÁ, J., VAVRO, M., STANĚK, S.: Vývoj a výzkum vlastností tepelně izolačních alkalicky aktivovaných systémů. In *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava*. 2011, vol. 2, 65 – 74. ISSN 1213-1962
- [27] VAVRO, M., BOHÁČOVÁ, J., BUJDOŠ, D., TOMKOVÁ, J., VLČEK, J.: Alkalicky aktivované materiály jako primární ochrana povrchu betonových výrobků. In *Sbor. CONSTRUMAT 2011*. Košice: TU Košice. 2011, 244 – 248. ISBN 978-80-553-0685-8.
- [28] BRANDŠTETR, J. a J. HAVLICA. Zeolity v maltách a betonech. *Materiály pro stavbu*. 2000, č. 6, s. 48-50. ISSN 1211-0787.
- [29] [Http://www.cluz.cz/](http://www.cluz.cz/) [online]. 2012 [cit. 2012-09-03]. Dostupné z: <http://www.cluz.cz/>
- [30] [Http://www.sandteam.cz/](http://www.sandteam.cz/) [online]. 2012 [cit. 2012-09-03]. Dostupné z: <http://www.sandteam.cz/>
- [31] [Http://www.rgu.cz/download/holecek2009/14_prednaska.pdf](http://www.rgu.cz/download/holecek2009/14_prednaska.pdf) [online]. 2012 [cit. 2012-09-03]. Dostupné z: <http://www.rgu.cz>

Oponentní posudek vypracoval:

RNDr. Eva Terpáková, PhD., Katedra materiálového inženýrství, Stavební fakulta, TU v Košiciach.

Doc. Ing. Milena Pavlíková, Ph.D., Katedra materiálového inženýrství a chemie, Stavební fakulta, ČVUT v Praze.